انجمن آهن و فولاد ایران

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



بررسی تأثیر نسبت سیستم راهگاهی بر کیفیت ریخته‌گری بدنه پمپ فولادی به کمک شبیه‌سازی[*]

مقاله پژوهشی

مرتضی آذربرمس[(۱)]

DOI: 10.22067/jmme.2024.83486.1116

چکیده *با توجه به تاثیر نسبت سیستم راهگاهی بر میزان حفرات انقباضی تشکیل شده و در نتیجه بر خواص مکانیکی قطعات فولادی، بهینه سازی سیستم راهگاهی یکی از مباحث مورد علاقه محققین فعال در زمینه ریخته‌گری است. در این تحقیق، ریخته‌گری بدنه پمپ گریز از مرکز فولادی، شبیه سازی شده، در ادامه تاثیر نسبت سیستم راهگاهی بر کیفیت محصول به دست آمده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای مورد ارزیابی شامل محل تشکیل نقاط داغ، سرعت عبور ذوب از راهباره‌ها و یکنواختی ورود ذوب از راهباره‌ها می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان داد که در مورد قطعه مورد بررسی، هر دو نسبت راهگاهی پیشنهاد شده ۱:۲:۱/۵ و ۱:۳:۳ قادر به توزیع مناسب ذوب هستند. به نحوی که در هر دو نسبت راهگاهی، آخرین نقاطی که منجمد می‌شوند، دور از مناطق تحت تنش بالا در قطعه خواهند بود. اگرچه استفاده از نسبت راهگاهی ۱:۲:۱/۵ می‌توانند به پر بودن راهگاه و در نتیجه بهبود کارایی آن در جبران انقباض صورت گرفته منجر شود و از ورود گازهای خارجی تا حد زیادی جلوگیری نماید. همچنین ملاحظه شد که تقارن راهباره‌ها نسبت به یکدیگر اهمیت زیادی ندارد، بلکه تقارن آنها نسبت به محل راهگاه از اهمیت بالایی جهت اطمینان از سرعت و رفتار یکنواخت ذوب عبوری از راهباره‌های مختلف برخوردار است.*

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی ریخته‌گری، سیستم راهگاهی، بدنه پمپ، ریخته‌گری فولاد.

Evaluating Effects of the Gating Ratio on the Casting Quality of a Steel Pump Body Using the Simulation

Morteza Azarbarmas

Abstract *Due to effects of the gating ratio on the amount of shrinkage porosities and thereby on mechanical properties of steel components, optimizing the gating system is one of the interested fields for scientists focused on the casting industry. In this paper, the casting of a steel centrifugal pump body has been simulated and influences of the gating ratio on the casting quality of the obtained component have been evaluated. Investigated parameters involve the place of formed hot-spots, the speed of the liquid flowing from gates and its uniformity. The obtained results show that in the case of the evaluated component, both of the suggested gating ratios of 2:1.15 and 1:3:3 can distribute the melt well in such a way that the last solidified parts are far from the portions experiencing high stresses during the service. However, using the gating ratio of 1:2:1.5 lets that the sprue to be full of the liquid metal. So, the sprue can compensate the occurred shrinkage and almost prevent the entrance of the out gases. Moreover, it was observed that the symmetry of gates with respect to each other does not have an important effect but with respect to the position of the sprue has a crucial role to ensure a similar speed and behavior of the metal flowing in the different gates.*

Keywords Casting Simulation , Gating System , Pump Body, Steel Casting.

[*] تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۴/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۱/۲ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند.

Email: azarbarmas@sut.ac.ir

مقدمه

برای به دست آوردن یک محصول ریخته‌گری با کیفیت مناسب، طراحی سیستم راهگاهی نقش اساسی دارد. یک سیستم راهگاهی مناسب، نحوه پر شدن و نیز الگوی جریان فلز را در قالب کنترل می‌کند. در مورد قطعات نسبتا بزرگ [1] یا پیچیده، جهت اطمینان از توزیع مناسب سیلان مذاب، چندین راهباره با موقعیت مناسب مورد نیاز است [2]. تا جایی‌که امکان‌پذیر است، بایستی تمهیداتی اندیشید تا جریان مذاب به صورت یکنواخت از طریق راهباره‌های مختلف وارد حفره قالب شود تا شرایط انجمادی و در نتیجه ریزساختار و خواص مکانیکی یکنواختی در سرتاسر قطعه ایجاد شود. برای این منظور، معمولا مساحت مقطع عرضی [3,4]، شکل و طول یکسانی برای راهباره‌ها انتخاب می‌شود [5]. با طراحی مناسب مقطع عرضی راهباره‌ها می‌توان زمان و سرعت پر شدن قالب را کنترل کرد [6]. یکی دیگر از پارامترهای مهم در ریخته‌گری، نرخ جریان مذاب در قالب است. بخصوص در مورد قطعات نازک و طویل که سرعت سرمایش در طول مسیر بالاست و در صورت کافی نبودن نرخ جریان مذاب، پر نشدن کامل قطعه محتمل خواهد بود. همچنین در صورت نیاز به افزایش سرعت تولید، نرخ جریان ذوب بالا مطلوب می‌باشد. البته سرعت خیلی بالا نیز معایبی از قبیل ایجاد آشفتگی در جریان ذوب و به دام افتادن گازها و شستن ماسه‌های در مسیر حرکت ذوب را به دنبال دارد. از این رو است که بهینه نمودن سرعت حرکت ذوب حین ریخته‌گری، یکی از بحث‌های جذاب در بین محققین این حوزه می‌باشد [7,8]. پارامتر دیگری که در طراحی سیستم راهگاهی مهم است، «بازده ریخته‌گری» است [9] تا بتوان با کمترین هدر رفت مذاب در بخش سیستم راهگاهی و تغذیه‌گذاری، بتوان قطعات سالمی را تولید کرد.

مورات زور و همکاران [10] گزارش کرده‌اند که انتخاب یک سیستم راهگاهی مناسب اهمیت زیادی در کاهش عیوب غیرفلزی مانند عیوب سرباره، گازی و ماسه‌ای در ریخته‌گری فولادها دارند. همچنین تاثیر انتخاب نوع سیستم راهگاهی بر کاهش ایجاد ترک ناشی از هیدروژن در فولادهای ریختگی به اثبات رسیده است [11]. کو و همکاران [12] با مقایسه عملکرد سیستم‌های راهگاهی مختلف برای قطعه منیفولد اگزوز (exhaust manifold) فولادی، نشان دادند که استفاده از سیستم راهگاهی کناری می‌تواند پایداری جریان ذوب را بهبود داده، احتمال به دام افتادن گازها را در قطعه کاهش دهد. اخیرا جزیرسکی و همکاران[13] با بررسی تاثیر نوع طراحی سیستم راهگاهی بر کیفیت ریخته‌گری فولادها نشان دادند که کنترل سرعت ذوب و آشفتگی آن براحتی با طراحی مناسب سیستم راهگاهی میسر است. نتایج ایشان نشانگر این بود که برای قطعات فولادی سنگین، استفاده از راهباره‌های سه‌گانه و پیش‌بینی تله‌های چرخشی و تله‌هایی برای جمع شدن حباب‌ها می‌تواند مفید باشد. در کار مشابهی، الربعی و همکاران [14] مشاهده کردند که با اصلاح ابعاد و موقعیت راهباره‌ها می‌توان به طور محسوسی میزان تخلخل‌های انقباضی و گازی را در فولادها کاهش داده، در نتیجه خواص مکانیکی را بهبود داد و از بروز شکست ناگهانی در بدنه پمپ‌ها تا حد زیادی جلوگیری کرد.

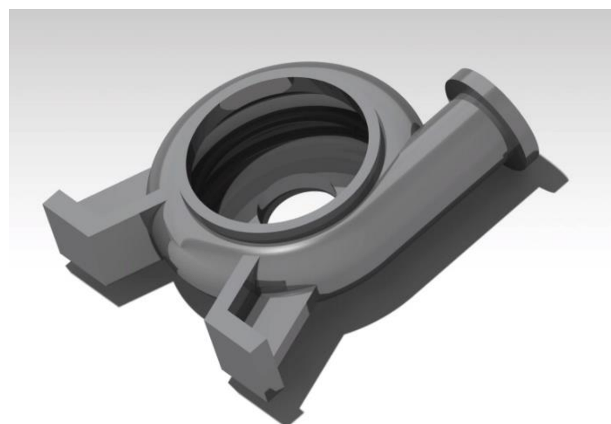
نرخ جریان ذوب به کمک کوچکترین بخش سیستم راهگاهی (Choke) [15] که می‌تواند پایین‌ترین بخش راهگاه یا مقطع عرضی راهباره‌ها در نظر گرفته شود، کنترل شده، می‌توان از آن، برای تنظیم فشار ریخته‌گری استفاده کرد [16]. نسبت سیستم راهگاهی که عبارت است از نسبت «مساحت مقطع عرضی پایین راهگاه» به «مقطع عرضی راهبار» و «مجموع مقاطع عرضی راهباره‌ها»، تعیین کننده نرخ جریان ذوب به داخل حفره قالب می‌باشد. انتخاب یک نسبت سیستم راهگاهی مناسب، اولین قدم در طراحی سیستم راهگاهی در نظر گرفته می‌شود [17]. با توجه به اینکه آیا این نسبت به صورت کاهشی است یا افزایشی، می‌توان سیستم‌های راهگاهی را به دو بخش پرفشار و کم فشار تقسیم‌بندی نمود. در سیستم‌های پرفشار، مقاطع عرضی به سمت راهباره کوچکتر می‌شود، لذا حجم زیادی از مذاب در لوله راهگاه جمع شده، ذوب با فشار بالایی وارد حفره قالب می‌شود. برعکس، در سیستم‌های کم فشار، چون مقاطع عرضی به سمت راهباره، گشادتر انتخاب می‌شود، ذوب با فشار کمتری وارد حفره قالب می‌شود.

هر کدام از سیستم‌های پرفشار و کم‌فشار راهگاهی مزایا و معایب خود را دارند. در کارهای متعددی، استفاده از سیستم راهگاهی پرفشار در مورد ریخته‌گری فولادها گزارش شده است [18,19]. یکی از نسبت‌های سیستم راهگاهی استفاده شده در مورد ریخته‌گری فولادها، ۱:۲:۱/۵ است [20]. با این حال، استفاده از نسبت‌های سیستم راهگاهی کم فشار نیز در مورد فولادها گزارش شده است [21]. در این تحقیق تاثیر انتخاب نوع

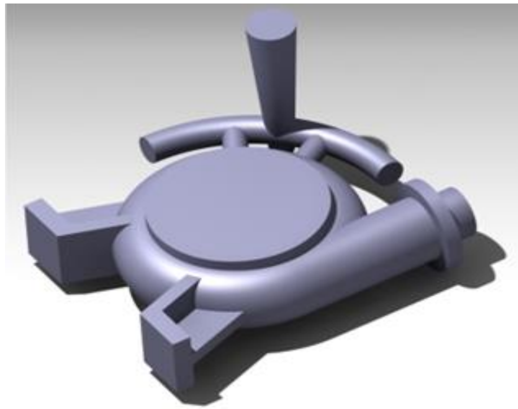
سیستم راهگاهی در ریخته‌گری بدنه پمپ گریز از مرکز فولادی به کمک شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین تاثیر انتخاب راهباره‌های متقارن نسبت به محل راهگاه نیز بر کیفیت ریخته‌گری بررسی شده است. با توجه به اینکه، مشاهده شده است که تفاوت نرخ جریان و نیز سرعت متوسط ورود ذوب به قطعه از طریق راهباره‌های مختلف در حالتی که راهگاه از وسط راهبار متصل شده است، کمتر از حالتی است که راهگاه از ابتدای راهبار به آن متصل شده است [22]، در تمامی طرح‌های بررسی شده، راهگاه از وسط راهبار متصل شده است.

روش تحقیق

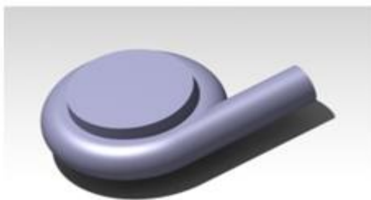
شکل (۱) تصویر شماتیک بدنه پمپ گریز از مرکز استفاده شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در این تحقیق، ابتدا مدل ریخته‌گری این قطعه با لحاظ تکیه‌گاه‌های ماهیچه، طراحی و سپس از روی آن، قالب مورد نظر مدلسازی شد (شکل ۲-الف). در ادامه، مدل سه بعدی بدنه پمپ به همراه ماهیچه متناسب (شکل ۲-ب) و بدنه قالب برای انجام مراحل شبیه‌سازی ریخته‌گری به نرم‌افزار پروکست منتقل شد. آلیاژ مدنظر، جنس قالب و جنس ماهیچه به ترتیب فولاد زنگ نزن CF8M، ماسه سیلیسی و ماسه رزینی انتخاب شدند. همچنین دمای ریختن ذوب، دمای ۱۶۸۰ در نظر گرفته شد. پارامترهای مهم شبیه‌سازی در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۱ شماتیک بدنه پمپ فولادی استفاده شده جهت شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری



الف



ب

شکل ۲ شماتیک مدل (الف) و ماهیچه (ب) استفاده شده برای ساخت قالب ریخته‌گری بدنه پمپ گریز از مرکز

جدول ۱ پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی ریخته‌گری بدنه پمپ فولادی

نام پارامتر	مقدار تعریف شده
دمای ریختن	۱۶۸۰
دمای قالب و ماهیچه	۲۵
ضریب انتقال حرارت ماسه و قطعه W/m² °C	۴۰۰
ضریب انتقال حرارت ماسه و ماسه W/m² °C	۲۰۰
جنس ماسه	ماسه سیلیسی
جنس آلیاژ	فولاد زنگ نزن CF8M
سرعت ریختن ذوب kg/s	۱

پس از وارد کردن هندسه مدل، قالب و ماهیچه به محیط پروکست، پارامترهای شبیه‌سازی تعریف شد و با شرط توقف رسیدن دمای تمامی نقاط قطعه به زیر دمای سالیدوس (۱۳۰۹)، شبیه‌سازی اجرا و به اتمام رسید. پارامترهای مورد ارزیابی شامل نسبت سیستم راهگاهی، تعداد و محل راهباره‌ها در سیستم

راهگاهی می‌باشند. جزئیات این پارامترها در جدول ۲ آورده شده است. پس از انجام شبیه‌سازی، نتایج به دست آمده گزارش شده و مورد بحث قرار گرفته‌اند.

جدول ۲ پارامترهای مورد ارزیابی در طول شبیه‌سازی بدنه پمپ گریز از مرکز

نام طرح مورد استفاده	نسبت سیستم راهگاهی	تعداد راهباره
طرح ۱	۱:۲:۱/۵	۲
طرح ۲	۱:۳:۳	۲
طرح ۳	۱:۳:۳	۳

نتایج و بحث

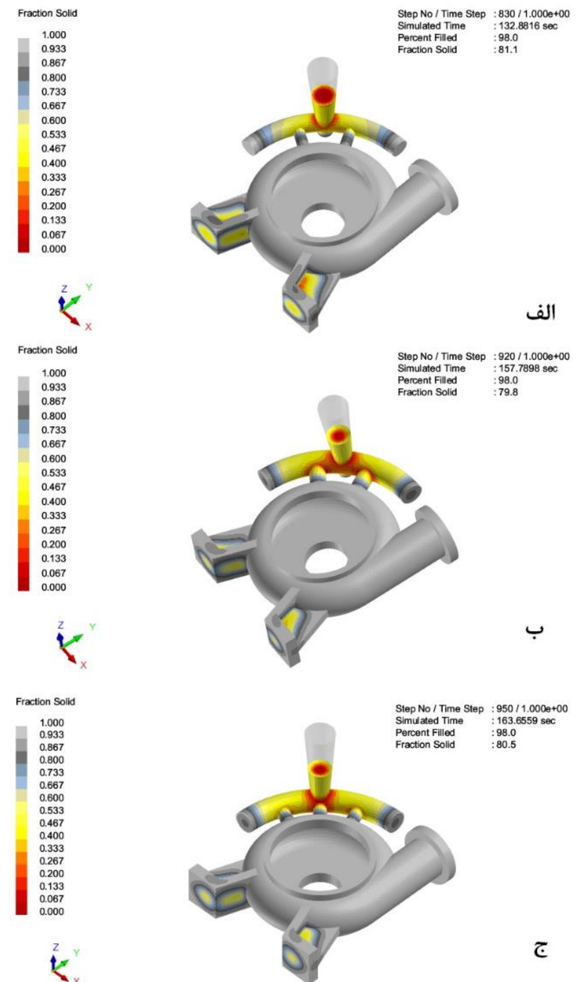
معمولا یکی از مهمترین پارامترهای مورد برررسی در شبیه‌سازی ریخته‌گری، تشکیل نقاط داغ (hot spots) می‌باشد. طراحی سیستم راهگاهی باید به گونه‌ای باشد که این نقاط در بخش‌های مرکزی و مکان‌های دور از راهگاه یا تغذیه تشکیل نشوند. چرا که تشکیل این نقاط به معنی انجماد دیرتر این نقاط بوده و در صورت عدم دسترسی به ذوب، در آنها حفرات انقباضی تشکیل خواهد شد [23,24]. شکل (۳) نتایج شبیه‌سازی سه طرح مورد استفاده را در واپسین لحظات انجماد نشان می‌دهد (زمانی که حدود ۸۰ درصد ساختار منجمد شده است). مشابه کارهای دیگر گزارش شده[25,26]، در این مقاله، نتایج شبیه‌سازی تا ۸۰٪ انجماد مورد بحث قرار می‌گیرند. دلیل این موضوع این است که در این میزان از انجماد، تفاوت دمایی ایجاد شده در بخش‌های مختلف قطعه، بهتر نشان داده می‌شود. با پیشرفت بیشتر انجماد، بخش‌های دورتر از جبهه انجماد، سرد شده و توزیع دمایی یکنواختی برای این نواحی مشاهده خواهد شد.

ملاحظه می‌شود که در هر سه طرح، بخش‌های منجمد نشده، در بخش بدنه اصلی پمپ تشکیل نشده و آخرین بخش در حال انجماد، در نزدیکی پایه‌های پمپ می‌باشد که نشان از طراحی مناسب سیستم راهگاهی دارد، چرا که احتمال تشکیل حفره در بخش‌های حساس قطعه کاهش یافته است. لازم به ذکر است که در مورد بدنه پمپ‌های در حال کار، بیشترین تنش در بدنه اصلی و کمترین تنش در نزدیکی پایه‌ها تشکیل می‌شود.

با دقت در شکل (۳) می‌توان ملاحظه نمود که در صورت استفاده از سیستم راهگاهی پرفشار (طرح ۱)، مذاب موجود در راهگاه تا انتهای انجماد همچنان به صورت مذاب باقی می‌ماند (برعکس سیستم کم فشار (طرح ۲) که در آن، دیواره ضخیمی از راهگاه منجمد شده است). این امر می‌تواند به ذوب‌رسانی بهتر از طریق راهگاه در لحظات انتهایی انجماد و جبران انقباضات رخ داده حین کاهش دمای ذوب و حین استحاله مذاب به جامد کمک کند. دلیل این موضوع به این خاطر است که به دلیل کوچک بودن مجاری ورود ذوب به داخل حفره قالب، حجم مذاب موجود در راهگاه سیستم پرفشار، بیشتر از حجم مذاب موجود در راهگاه سیستم کم فشار خواهد بود. لذا کاهش دمای مذاب راهگاه در سیستم پرفشار کندتر رخ خواهد داد. البته بایستی دقت کرد که انتخاب سیستم پرفشار به نحوی که مجاری راهباره آن بیش از اندازه باریک باشد، می‌تواند به افت دمای این منطقه و حتی بسته شدن مسیر بیانجامد. این عیب را می‌توان با انتخاب طول راهبار و راهباره کوتاه‌تر تا حدی رفع کرد تا فرصت برای افت دمای این منطقه محدودتر شود.

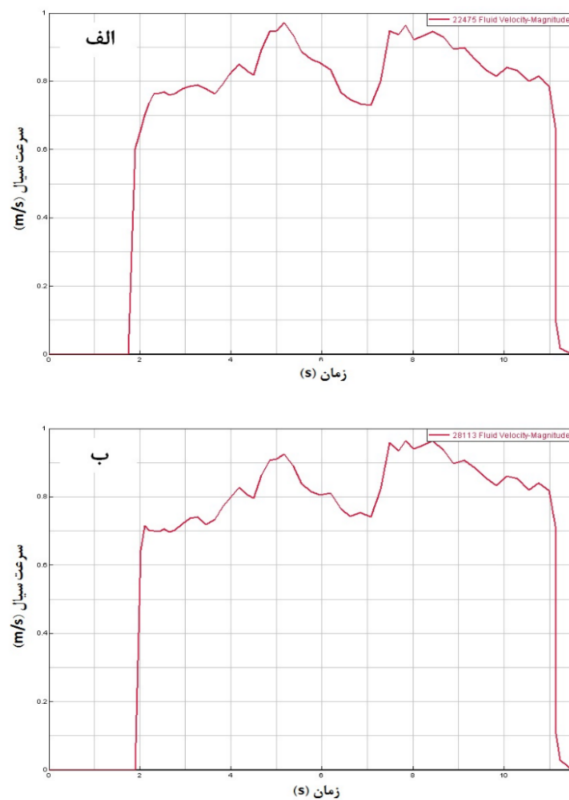
شکل (۴) و (۵) سرعت ورود ذوب از رهباره‌های تعبیه شده در سیستم راهگاهی به ترتیب طرح ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. مشاهده می شود که به دلیل طراحی متقارن مسیر راهباره‌ها، سرعت ورود مذاب از راهباره‌ها یکنواخت است. البته با اینکه دو راهباره مورد استفاده در این دو طرح، تا قبل از اتصال به محل قطعه، کاملا متقارن هستند ولی موقعیت اتصال این دو نسبت به بخش‌های مختلف قطعه متفاوت هست. برای مثال راهباره سمت راست، به لوله خروجی پمپ نزدیک‌تر است (نسبت به راهباره سمت چپ) – به شکل (۳) توجه شود – بنابرین سرعت و جهت حرکت سیال عبوری از دهانه این دو راهباره نیز اندکی متفاوت خواهد بود.

دقت در این شکل‌ها نشان می‌دهد که سرعت حرکت مذاب در هر دو راهباره طرح ۱ مابین ۰/۷ تا m/s ۱ (شکل ۴) و در مورد طرح ۲ مابین ۰/۳۱ تا m/s ۰/۵۶ (شکل ۵) قرار دارد و روند مشابهی را طی می‌کنند.

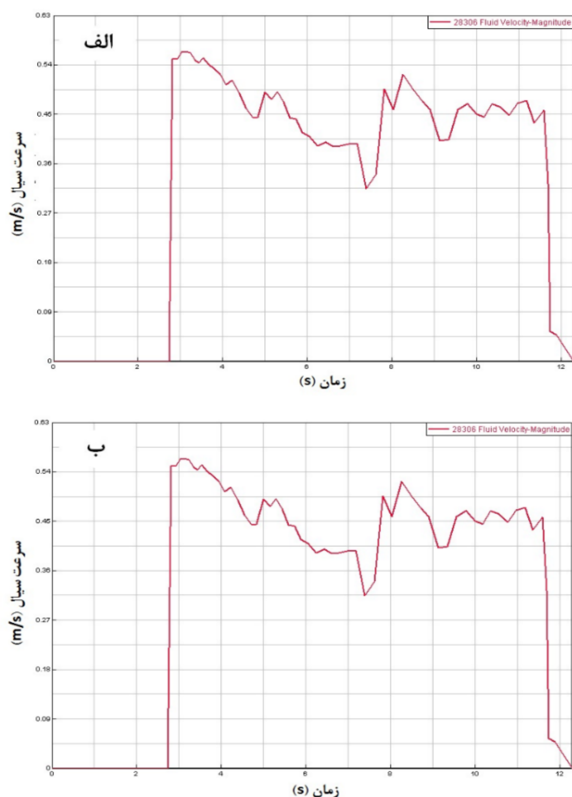


شکل ۳ کانتور کسر جامد در بخش‌های مختلف بدنه پمپ شبیه‌سازی شده با استفاده از سیستم‌های راهگاهی طرح‌های (الف) ۱، (ب) ۲ و (ج) ۳

در مورد طرح ۳ (شکل ۶) با وجود تقارن در طراحی مسیر راهباره‌گذاری، ولی چون فاصله راهباره‌ها از راهگاه با یکدیگر برابر نیست، اختلاف زیادی بین سرعت حرکت مذاب در راهباره کناری و راهباره میانی وجود دارد. مقدار این سرعت به ترتیب در محدوده ۰/۳۰ تا m/s ۰/۵۲ و محدوده ۰/۶۴ تا m/s ۰/۸۷ قرار دارد. بدیهی است که راهباره میانی به دلیل نزدیکی به راهگاه، هم زودتر ذوب‌رسانی خواهد کرد و هم سرعت خروج مذاب آن بیشتر خواهد بود. این تفاوت زمانی و تفاوت سرعت ورود ذوب از راه‌باره های مختلف، منجر به سرعت های سرمایش متفاوت و در نتیجه ریزساختار و خواص مکانیکی متفاوتی در قطعه شده، آنیزوتروپی در خواص را ایجاد خواهد کرد. بنابرین با لحاظ یکنواختی سرعت خروج ذوب از راهباره‌ها، طرح ۳ به هیچ عنوان پیشنهاد نمی‌شود.



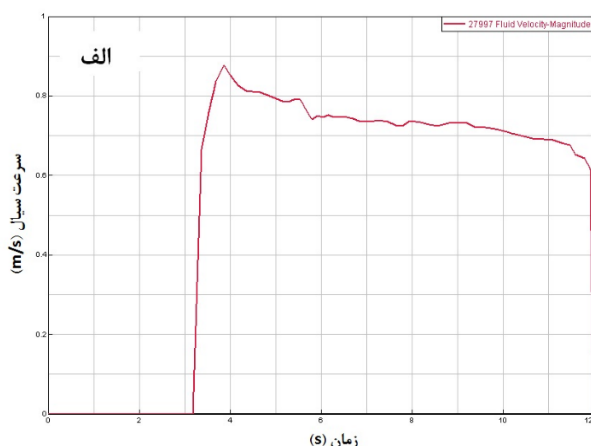
شکل ۴ منحنی‌های سرعت سیال نسبت به زمان ریخته‌گری برای مجاری راهباره در (الف) و (ب) دو راهباره تعبیه شده در طرح ۱

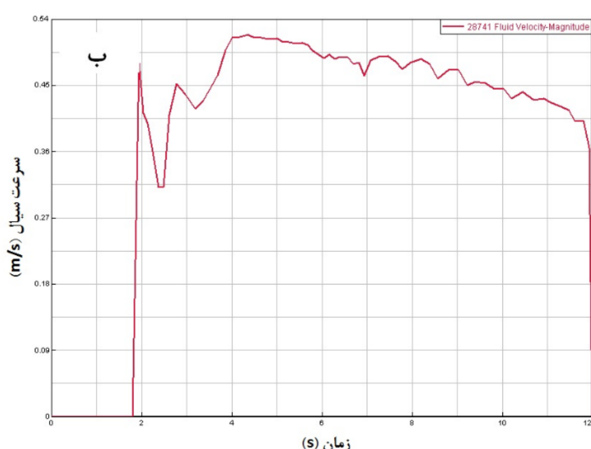


شکل ۵ منحنی‌های سرعت سیال نسبت به زمان ریخته‌گری برای مجاری راهباره در (الف) و (ب) دو راهباره تعبیه شده در طرح ۲

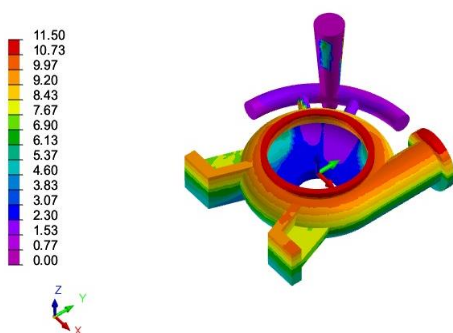
از میان طرح ۱ (سیستم پرفشار) و طرح ۲ (سیستم کم فشار)، سیستم پرفشار مزایای زیادی دارد. جداسازی سیستم راهگاهی از قطعه در طرح ۱ راحتتر است که به دلیل ضخامت کمتر محل اتصال می‌باشد. همچنین چون در سیستم پرفشار، حجم بالایی از مذاب در راهگاه جمع می‌شود، لذا کاهش دمای کمتری را تجربه کرده و نیاز به حجم بالایی از تغذیه در سیستم وجود نخواهد داشت. به علاوه، پر بودن راهگاه باعث می‌شود که ورود هوا و گاز کمتری به داخل قالب اتفاق بیافتد و مذاب ارتفاع کمتری را تا رسیدن به سطح ذوب انباشته شده در راهگاه طی کند. در واقع یکی از دلایل استفاده از سیستم راهگاهی پرفشار همین کاهش اکسیداسیون ذوب می‌باشد [27]. البته سیستم راهگاهی پرفشار معایبی نیز دارد که از جمله می‌توان به احتمال شسته شدن قالب و تلاطم بالای مذاب بخصوص در مورد آلیاژهای با چگالی پایین اشاره کرد که در مورد بدنه پمپ بررسی شده در این مقاله، به علت چگالی بالای فولاد، این مسئله مشکل‌ساز نخواهد شد. همچنین مدت زمان بالای قرار گیری ذوب در محفظه راهگاه می‌تواند برای آلیاژهای با قابلیت جدایش عناصر سازنده بالا [28,29] مشکل‌ساز باشد.

شکل (۷) کانتور مربوط به زمان پر شدن مناطق مختلف بدنه پمپ گریز از مرکز شبیه‌سازی شده با استفاده از سیستم راهگاهی طرح ۱ را نشان می‌دهد. عددهای روی کانتور، زمان پر شدن بر حسب ثانیه را نشان می‌دهند. برای مثال رنگ قرمز نشانگر این است که برای اینکه این مناطق پر شوند، بایستی بیش از ۱۰ ثانیه از ابتدای ذوب‌ریزی سپری شود. ملاحظه می‌شود که آخرین بخش‌هایی که پر شده‌اند، بخش‌های فوقانی قطعه بوده‌اند. معمولا آخرین ذوبی که وارد حفره قالب می‌شود، داغتر از ذوبی است که در لحظات اول وارد حفره قالب شده است. زیرا ذوب اولیه، به دلیل سرد بودن قالب و حرکت در داخل قالب، سرد می‌شود. اینکه آخرین ذوب به نواحی بالایی بدنه پمپ وارد شده است، می‌تواند نشان‌دهنده این امر باشد که اگر بنا بر استفاده از تغذیه باشد، توصیه می‌شود که در بخش بالایی بدنه پمپ باشد تا کاهش حجم ناشی از انجماد و سرمایش را در این مناطق جبران نماید. معمولا در این نوع قطعات، تغذیه‌هایی که استفاده می‌شوند به صورت متقارن در نظر گرفته می‌شوند. برای مثال می‌توان سه عدد تغذیه با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر روی سقف قطعه تعبیه کرد. با توجه به اینکه ضخامت دیواره‌های قطعه نسبتا نازک است، تغذیه‌هایی که استفاده می‌شوند بایستی گلویی نیز داشته باشند تا موقع جدا کردن تغذیه از قطعه، آسیبی به خود قطعه وارد نشود.





شکل ۶ منحنی‌های سرعت سیال نسبت به زمان ریخته‌گری برای مجاری راهباره در (الف) و (ب) به ترتیب راهباره وسطی و راهباره کناری تعبیه شده در طرح ۳



شکل ۷ کانتور مربوط به زمان پر شدن مناطق مختلف بدنه پمپ حین ریخته‌گری با استفاده از طرح سیستم راهگاهی ۱

نتیجه گیری

در این مقاله، ریخته‌گری ثقلی بدنه پمپ گریز از مرکز فولادی به کمک نرم‌افزار پروکست شبیه‌سازی شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، موارد زیر به عنوان مهمترین نتایج این کار قابل استخراج می‌باشند:

۱. مشاهده شد که طراحی سیستم راهگاهی ارائه شده می‌تواند نقاط داغ را به بیرون از بدنه اصلی پمپ که تحت تنش‌های بزرگ قرار می‌گیرد، هدایت کرده، احتمال تشکیل تخلخل‌های انقباضی را در بدنه اصلی کاهش دهد.

۲. استفاده از سیستم راهگاهی پرفشار پیشنهاد شده، قادر است با انباشت ذوب در راهگاه، از سرمایش زودهنگام راهگاه جلوگیری کرده، به عمل ذوب‌رسانی کمک کند.

۳. نتایج نشان داد که در طراحی سیستم راهگاهی، طراحی متقارن محل راهباره‌ها کافی نیست و بایستی فاصله آن‌ها از محل اتصال راهگاه نیز یکسان باشد. در غیر اینصورت، سرعت عبور ذوب از راهباره‌ها و در نتیجه سرعت سرمایش و خواص نقاط مختلف، متفاوت خواهد بود.

۴. با توجه به اینکه آخرین بخشی که ذوب وارد آن می‌شود، نواحی بالایی بدنه پمپ بود، این نواحی، به عنوان مناطق مناسب برای تعبیه تغذیه پیشنهاد شدند.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] E. Touceda, "Pertinent Facts Concerning Malleable-Iron Castings", SAE Trans., pp. 632–660, 1922..

[2] I. Rajkumar, N. Rajini, A. Nair, K. A. Prasath, M. Ramaganesh, and G. R. Kharrthikeyan, "Optimization of multi gating system for the experimental investigation inflow parameters with effects of design in small scale industries", *Materials Today: Proceeding*, vol. 59, pp. 769–774, 2022. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.578

[3] K. H. Renukananda and B. Ravi, "Multi-gate systems in casting process: comparative study of liquid metal and water flow", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 8, pp. 1091–1101, 2016. https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1037911

[4] P. K. Seo, D. U. Kim, and C. G. Kang, "The effect of the gate shape on the microstructural characteristic of the grain size of Al–Si alloy in the semi-solid die casting process", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 445-446, pp. 20–30, 2007. https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.133

[5] M. Thieman, R. Kamm, and J. Jorstad, "Copper motor rotors: Energy saving efficiency, now also economic feasibility", *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, pp. 328–333, 2007. https://doio.org/10.1109/EEIC.2007.4562637

[6] C. H. Kim and T. H. Kwon, "A runner–gate design system for die casting", *Taylor & Francis online*, vol. 16, no. 6, pp. 789-801 2006. https://doi.org/10.1081/AMP-100108699

[7] N. N. Xu, Z. Y. Zhang, H. G. Zhang, T. Lv, Y. Y. Liu, and Q. X. Hu, "The Optimization of Vacuum Casting Filling Velocity Based on Numerical Simulation", Key Eng. Mater, vol. 522, pp. 221–226, 2012. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.522.221

[8] A. B. Rice, "Numerical simulation of mold filling processes", Purdue University, 1993.

[9] I. Rajkumar, N. Rajini, T. R. Prabhu, S. O. Ismail, S. Siengchin, F. Mohammad, and H. A. Al-Lohedan, "Applicability of angular orientations of gating designs to quality of sand casting components using two-cavity mould set-up",

Transactions of the Indian Institute of Metals, vol. 75, pp. 513-524, 2021. https://doi.org/10.1007/s12666-021-02434-z

[10] M. M. Zor, A. Yoloğlu, S. Kesim, and F. Tülüce, "Pressurized gating system design and optimization in steel castings", *Eng. Applied*, vol. 1, no. 1, 2022.

[11] M. M. Zor, F. Tülüce, S. Kesim, and A. Yoloğlu, "The effect of molding and gating system design on hydrogen induced crack defects in steel castings", *Adv. Eng. Sci*., vol. 3, pp. 164–177, 2023.

[12] J.-K. Kuo, P.-H. Huang, H.-Y. Lai, and W.-J. Wu, "Design of casting systems for stainless steel exhaust manifold based on defective prediction model and experimental verification", *International Journal of Advanced Manufacturing Technologo*, vol. 100, pp. 529–540, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2737-8

[13] J. Jezierski, R. Dojka, and K. Janerka, "Optimizing the gating system for steel castings", *Metals*, vol. 8, no. 4, pp. 266, 2018. https://doi.org/10.3390/met8040266

[14] H. Alrobei, R. A. Malik, F. Amjad, and I. AlBaijan, "Investigation of Structure and Mechanical Characteristics of a High Manganese Steel via SolidCast Simulation Method", *Metals*, vol. 13, no. 3, pp. 572, 2023. https://doi.org/10.3390/met13030572

[15] A. Modaresi, A. Safikhani, A. M. S. Noohi, N. Hamidnezhad, and S. M. Maki, "Gating system design and simulation of gray iron casting to eliminate oxide layers caused by turbulence", *International Journal of Metalcasting*, vol. 11, pp. 328–339, 2017. https://doi.org/10.1007/s40962-016-0061-3

[16] R. Dojka, J. Jezierski, and M. Szucki, "The importance of the geometry of the down sprue in the gravity casting process", *Materials*, vol. 15, no. 14, pp. 4937, 2022. https://doi.org/10.3390/ma15144937

[17] O. A. Adefuye, O. Ji, L. Oi, and O. Fadipe, "Gating system design solutions for casting defects from pouring", *Eng. Technol. Res. J*., Vol. 5, No. 1, pp. 26–31, 2020. https://doi.org/10.47545/etrj.2020.5.1.057

[18] R. Dojka, J. Jezierski, and J. Campbell, "Optimized gating system for steel castings", *Journal of Materials Engineering and Performance,* vol. 27, pp. 5152–5163, 2018. https://doi.org/10.1007/s11665-018-3497-1

[19] J. K. Kuo, P. H. Huang, H. Y. Lai, and J. R. Chen, "Optimal gating system design for investment casting of 17-4PH stainless steel enclosed impeller by numerical simulation and experimental verification", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 1093–1103, 2017. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0198-0

[20] S. Santhi, B. R. Surya, S. Jairam, J. Jhansi, and P. K. S. Subramanian, "Design of gating and riser system for grate bar casting", *Indian Foundry J.*, vol. 61, no. 1, 2015.

[21] M. Iqbal, "Gating design criteria for sound casting", *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 3, no. 3, pp. 675, 2014. https://doi.org/: 10.18178/ijmerr

[22] M. B. N. Shaikh, S. Ahmad, A. Khan, and M. Ali, "Optimization of multi-gate systems in casting process: Experimental and simulation studies", *in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. https://doi.org/10.1088/1757-899X/404/1/012040

[23] T. R. Vijayaram, S. Sulaiman, A. M. S. Hamouda, and M. H. M. Ahmad, "Numerical simulation of casting solidification in permanent metallic molds", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 178, no. 1-3, pp. 29–33, 2006. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.025

[24] W. Li and J. Cui, "A new method for quickly locating the hot spots in solidification simulation of complicated castings", *International Journal Cast Metals Research*, vol. 15, no. 4, pp. 319-323, 2016. https://doi.org/10.1080/13640461.2003.11819505

[25] X. Qi, L. Liu, T. Riberi-Béridot, N. Mangelinck-Noel, and W. Miller, "Simulation of grain evolution in solidification of silicon on meso-scopic scale", *Computational Materials Science*, vol. 159, pp. 432- 439, 2019. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.12.015

[26] L. Chen et al., "Numerical simulation and optimization of indirect squeeze casting process", *Engineering Science*, vol. 13, no. 2, pp. 65–70, 2020.

[27] M. Bruna and M. Galčík, "Effect of Filter Type on Mechanical Properties During Aluminium Alloy Casting", *Arch. Foundry Eng.*, vol. 22, no. 3, 2022. http://doi.org/10.24425/afe.2022.140241

[28] M. Abdollahi, A. Aliadeh, S. poloee, M Zahmatkesh, "Investigation on Microstructure and Mechanical Behavior of Carbon and Glass Reinforced Aluminum CompositePipes*", Journal Metallurgical Materials Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 31–46, 2023.

[29] M. Alipour, "Investigation of the microstructure and mechanical properties of cast Al-8Zn-3Mg-2.5Cu nanocomposite reinforced with SiC nanoparticles after age hardening heat treatment", *Journal of Metallurgical and Materials Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 1–14, 2023. https://doi.org/10.22067/jmme.2022.79507.1084